

Desarrollo de un nuevo patrón de luminancia en el Instituto de Física Aplicada (CSIC)

Development of a new luminance standard at Instituto de Física Aplicada (CSIC)

Joseluís Fontecha, Antonio Corróns, Joaquín Campos, Alicia Pons

Departamento de Metrología del IFA (CSIC), Serrano 144, 28006 Madrid, E-mail: fontecha@ifa.cetef.csic.es

RESUMEN

Se ha realizado un patrón de luminancia basado en los Patrones de Referencia del Departamento de Metrología del IFA-CSIC, construido con equipos comerciales procedentes de un patrón de luminancia completo y una fuente de alimentación de corriente continua estabilizada. Se ha conseguido así disponer en nuestros laboratorios de un nuevo patrón cuya calibración es trazable a la Candela, realización de la unidad fundamental llevada a cabo en el IFA. Se ha estudiado la uniformidad espacial y temporal del instrumento y se ha procedido a su calibración en luminancia y al cálculo de incertidumbres.

Palabras clave: Radiometría, Fotometría, Luminancia.

ABSTRACT

There has been carried out a luminance standard based on the Reference Standards of the Departamento de Metrología of IFA-CSIC, made using parts of two commercial equipments: a whole luminance standard and a stabilized DC current source. In this way we have got a new standard whose calibration is traceable to the Candela, primary standard of Photometry made at IFA. We have studied the uniformity as far as space and time is concerned, and we have calibrated it in luminance and calculated the uncertainties.

Key words: Radiometry, Photometry, Luminance.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] Y. Ohno, "Improved photometric standards and calibration procedures at NIST", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **102**, 323-331 (1997).
- [2] P. Toivanen, P. Kärhä, F. Manoochchri, E. Ikonen, "Realization of the unit of luminous intensity at the HUT", *Metrologia* **37**, 131-140 (2000).
- [3] Joint ISO/CIE Standard ISO 10526:1999/CIE S005/E-1998 CIE Standard Illuminants for Colorimetry
- [4] P. Corredera, A. Corróns, A. Pons, J. Campos, "Absolute spectral irradiance scale in the 700-2400 nm spectral range", *Appl. Opt.* **29**, 3530-3534 (1996).
- [5] C. Carreras, A. Corróns, "Absolute spectroradiometric and photometric scales based on an electrically calibrated pyroelectric radiometer", *App. Opt.* **20**, 1174-1177 (1981).
- [6] J. Campos, A. Corróns, A. Pons, P. Corredera, "Realization of the candela from a partial filtering $V(\lambda)$ detector traceable to a cryogenic radiometer", *Metrologia* **32**, 675-679 (1996).
- [7] J. Campos, A. Pons, P. Corredera, "Spectral responsivity scale in the visible range based on single silicon photodiodes", *Metrologia* **40**, S181-S184 (2003).
- [8] A. Corróns, A. Pons, J. Campos, "Fully automatic absolute spectroradiometer", *Opt. Pura Apl.* **17**, 121-124 (1984).

- [9] A. Pons, J. Campos, A. Corróns, F. Samedov, "Key comparison EUROMET.PR-K3.b.1: Bilateral comparison on illuminance responsivity between IFA-CSIC/Spain and UME/Turkey", *Metrologia* **42**, 02002 (2005).
- [10] Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters. Publication CIE 69, (1987).
- [11] E. Zalewsky, "Photometry and Radiometry", *Handbook of Optics*, McGraw Hill (1995).
- [12] Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO/TAG 4/WG 3, June (1992).
- [13] Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. Centro Español de Metrología, Noviembre (1997).
- [14] M. G. Cox, P M Harris, "Measurement uncertainty and traceability", *Meas. Sci. Technol.*, **17**, 533-540 (2006).
- [15] G. Sauter, "Determination of measurement uncertainties in photometry, 6 Examples Solution", CIE expert Symposium 2001 on Uncertainty Evaluation.
- [16] G. Sauter, "Determination of measurement uncertainties in photometry", CIE expert Symposium 2001 on Uncertainty Evaluation.

1. Introducción

La luminancia es una magnitud compleja, desde el punto de vista de su medición, al ser evaluada por el sistema visual humano y llevar asociadas de forma implícita medidas de superficie, potencia óptica y ángulo sólido. Por ese motivo, la realización de un patrón de luminancia no es algo inmediato ni sencillo [1,2]. Además de cumplir con las condiciones requeridas a todo patrón de medida, un patrón de luminancia debe tener una superficie emisora uniforme y emitir según la ley de Lambert, para que la luminancia medida por cualquier luminancímetro no dependa de su configuración geométrica.

Un patrón de luminancia se puede realizar de diversas formas pero, exceptuando los basados en un radiador completo o "cuerpo negro", todos llevan incorporado un elemento difusor, al menos. La luz transmitida por los difusores habituales en Fotometría (vidrios deslustrados, blancos opales, etc.) difunden la luz siguiendo la ley del coseno para ángulos de hasta 50° en algunos casos, pero el problema principal que tienen es la falta de uniformidad de la superficie emisora. Este problema se puede subsanar si se irradia el difusor uniformemente. Existen fuentes de luz comerciales que cumplen muy bien esas condiciones, como se verá más adelante, y por ello se ha optado por una de ellas para este trabajo. En concreto se ha elegido la fuente de LMT LN3 de Lichtmesstechnik GMBH.

Al diseñar un patrón de luminancia es también importante que su distribución espectral sea la de uno de los iluminantes patrones de la CIE [3], puesto que al ser la luminancia una magnitud integrada espectralmente con una función de peso, se puede tener el mismo valor con distintas distribuciones espectrales. Por ese motivo, se optó por una fuente con una lámpara de incandescencia, con la que es

posible simular el Iluminante Patrón A de la CIE. Esto se consigue ajustando la corriente eléctrica de alimentación, por lo que la elección de dicha fuente es otro elemento crítico del diseño de un patrón de luminancia.

Tras el diseño, es necesario caracterizar bien los elementos elegidos antes de pasar a la calibración de la luminancia. Esta caracterización consiste en el estudio de la uniformidad de emisión de la superficie emisora, la estabilidad temporal, el ruido temporal y la concordancia de su distribución espectral con el iluminante A (temperatura de color), y por supuesto la luminancia, que son las medidas que se muestran en este trabajo.

La calibración de la luminancia de la fuente es el último paso que se presenta en este artículo. Se pueden usar distintos métodos para esta calibración, pero en un Laboratorio Nacional como el nuestro, es importante que todos los patrones sean trazables dentro del propio laboratorio. Por ese motivo, la luminancia del patrón se ha determinado a partir de la iluminancia que produce en un plano a una distancia conocida. Como se puede comprobar en las referencias [4-7] esta medida es trazable a la realización de la Candela.

2. Descripción del patrón de luminancia

El patrón se compone de dos unidades: fuente de luz y fuente de alimentación. La parte más importante es la fuente de luz que, como se ha dicho antes, es la del modelo LMT LN3 de Lichtmesstechnik GMBH. Consta de una esfera integradora de 250 mm de diámetro recubierta por una pintura cuya reflectancia, $\rho \approx 0.8$, es no selectiva en longitud de onda en el rango visible del espectro, lo que proporciona un cambio de color mínimo de la luz reflejada en relación con la emitida por la lámpara.

Se ilumina mediante una lámpara halógena de 20 W y 12 V del tipo Osram 64427S, cuya vida media es de 4000 horas, situada tal como se puede ver en la figura 1. La lámpara ilumina una pantalla difusora translúcida situada en el ecuador de la esfera que, a su vez ilumina a otra pantalla igualmente difusora translúcida, situada en la apertura de la esfera, que es la que se usa como superficie de referencia del patrón de luminancia. El diámetro nominal de la superficie difusora de la apertura es 70 mm.

Como fuente de corriente externa se ha elegido una fuente Agilent E3645A cuya inestabilidad en corriente esta limitada al 0.01%+250 μ A (0,02% en nuestro caso).

Además el patrón incluye un filtro neutro de transmitancia aproximada 10%, que cubre por completo la apertura del difusor de la fuente de luz con el que será calibrado también. Este filtro permite tener dos niveles de luminancia con la misma distribución espectral aproximadamente, lo que es interesante para calibrar medidores de baja luminancia.

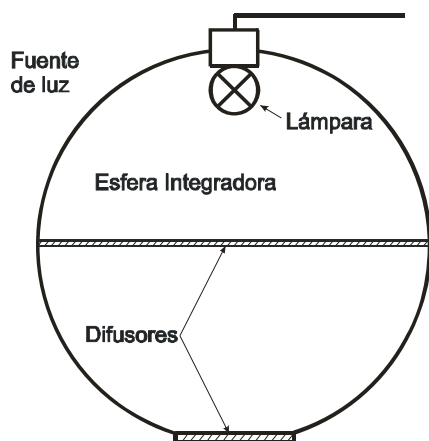


Fig. 1. Esquema de la fuente de luz del Patrón de Luminancia

3. Caracterización fotométrica del patrón de luminancia

La caracterización fotométrica incluye la evaluación de la uniformidad de emisión de la superficie, la estabilidad temporal, el estudio de la relación entre la *TCC* y la corriente de alimentación y, finalmente la calibración de la luminancia. Éste es un patrón extenso, de forma que la posterior calibración de un luminancímetro con este patrón se puede realizar tomando diferentes zonas o diferentes tamaños de superficie según sus características geométricas, por tanto, si la luminancia no es perfectamente uniforme se podrían tomar valores distintos de ella según la zona elegida. Como resulta imposible tomar siempre la misma zona se considera que esta no uniformidad

es equivalente a un término de incertidumbre. Por tanto es necesario realizar siempre una medida de la uniformidad de estos patrones. Otro tanto puede decirse de la inestabilidad temporal de la luminancia, que, por la misma razón, da lugar también a un término de incertidumbre. Para conocer la magnitud de estas incertidumbres se realizarán las medidas de uniformidad y estabilidad del patrón.

Por otra parte hay que reproducir lo más fielmente posible el iluminante A de la CIE, y por tanto habrá que fijar la corriente de alimentación que produzca la Temperatura de Color Correlacionada (*TCC*) de 2856 K, es decir, se realizará una medida de la *TCC* en función de la corriente de alimentación. Finalmente se realizará la medida de la luminancia del patrón con y sin filtro neutro.

3.1. Medida de la uniformidad del patrón.

La medida de uniformidad del patrón se ha realizado utilizando un montaje como el de la figura 2. Para su realización se ha utilizado un espectro-radiómetro Minolta CS-1000 colocado a una distancia de 222 mm de la superficie de referencia del patrón y con su eje óptico perpendicular a ella, de forma que el área de medida es un círculo de 10 mm de diámetro. La medida se realiza siguiendo una retícula rectangular equiespaciada en las direcciones X e Y, de 8 mm. De esta forma se obtiene como zona válida de medida un círculo de 25 mm de radio, ya que en esta zona, las áreas medidas por el espectro-radiómetro están completamente incluidas en la apertura difusora del patrón.

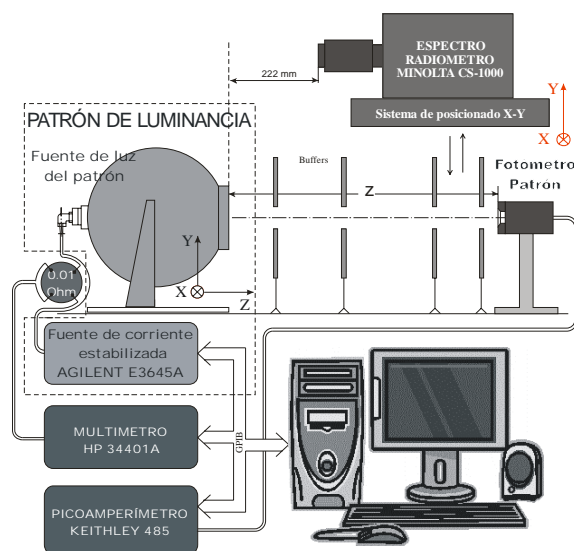


Fig. 2. Esquema de los dispositivos usados para las medidas de uniformidad, estabilidad y luminancia del Patrón

Los valores relativos de la luminancia medida así varían entre 0.9948 y 1, de forma que el valor de la desviación típica en la zona de interés, la incluida en un círculo de diámetro 50 mm, es del 0.15 %. Teniendo en cuenta que se ha muestreado sobre 21 puntos, la incertidumbre típica que afecta a estos datos es de 0.03 %, que será la aportación de esta medida a la incertidumbre total. En la figura 3 se puede ver un diagrama de niveles de esta medida.

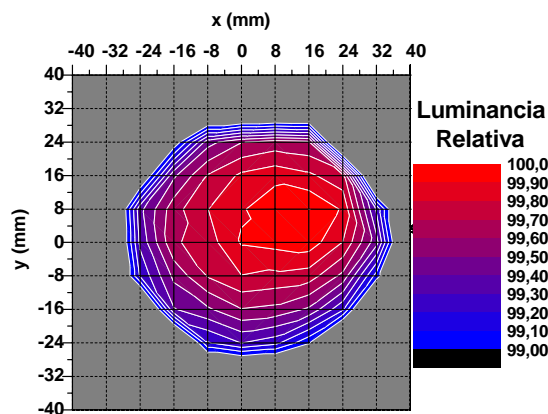


Fig. 3. Diagrama de niveles de la medida de uniformidad del patrón de luminancia.

3.2. Medida de la estabilidad del patrón

La medida se realizó usando el montaje cuyo esquema está representado en la figura 2. La distancia entre el fotómetro patrón FOTI, y el patrón de luminancia bajo estudio se redujo a 30 cm con el fin de tener una relación señal/ruido alta. Como la medida es relativa, esta distancia no necesita ser reproducida ni está sujeta a ninguna restricción, sólo debe mantenerse constante durante toda esta medida. Una muestra representativa de estas medidas se puede ver en la figura 4, en la que se observa que, a partir de unos 30 minutos la fotocorriente varía muy poco, ± 0.0014 % entre 30 y 90 minutos, presentando una tendencia asintótica muy clara. Por tanto se puede considerar que es suficiente tomar 30 minutos como tiempo de estabilización. De los valores citados se obtiene el término de incertidumbre típica debida a la inestabilidad del patrón, 0.00063 %.

3.3. Temperatura de color correlacionada

Como ya se ha dicho, una de las características que exigimos al patrón de luminancia es que su temperatura de color (*TCC*) sea tan próxima como se pueda a 2856 K, que es la del iluminante A de la CIE. El control de la *TCC* de nuestra fuente de luz se hace variando la corriente de alimentación de la lámpara.



Fig. 4. Corriente en el detector fotométrico patrón FOTI tras el encendido del patrón de luminancia

La medida de la *TCC* se realizó con el espectroradiómetro de referencia del Departamento de Metrología del IFA [8]. Se ha empleado para la comparación con nuestra fuente de luz una Lámpara Patrón de Irradiancia Espectral trazable a la Escala de Irradiancia del IFA [4,5]. En la figura 5 se presenta la *TCC* derivada de la medida en el espectro-radiómetro en función de la corriente de alimentación de la lámpara. Los datos se pueden aproximar muy bien mediante una recta, por eso, para calcular el valor de la corriente de alimentación que produce una *TCC* de 2856K, se ha empleado la aproximación lineal que está en el gráfico, cuyo coeficiente de correlación es $R^2 = 0.997$, obteniéndose un valor de 1,7012 A. Los valores de las coordenadas cromáticas también evolucionan en este rango siguiendo sendas rectas, por lo que se pueden calcular también por el mismo procedimiento. Creemos necesario destacar que la *TCC* medida aquí no es estrictamente la de la lámpara de incandescencia usada en el patrón, sino que es la del patrón completo, que incluye el efecto de la esfera integradora con todas las superficies reflectantes y los difusores cuya respuesta espectral no será nunca totalmente neutra.

A partir de este momento queda establecida la corriente de alimentación del patrón de luminancia que se usará en todas las medidas de calibración posteriores.

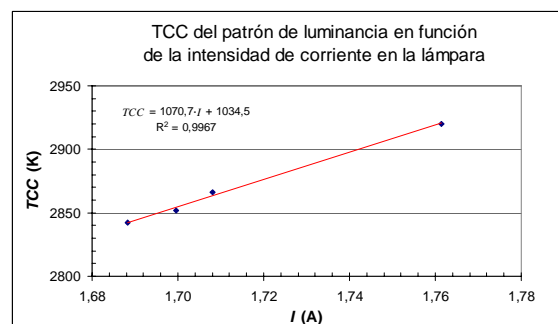


Fig. 5. Temperatura de color del nuevo patrón, derivada de la medida en el espectro-radiómetro, en función de la corriente de alimentación de la lámpara.

3.4. Medida de la luminancia

Uno de los principales objetivos de este trabajo es disponer de un patrón de luminancia trazable a la realización de la Candela. Por eso, una vez establecida la corriente de alimentación, se calibrará el patrón de luminancia usando como patrón FOTI, que es un fotómetro patrón trazable directamente a la Candela Patrón, que es el Patrón Nacional de Intensidad Luminosa, del cual el Departamento de Metrología del CSIC es depositario, que a su vez es trazable directamente al Radiómetro Criogénico. Además está avalado por Comparaciones Internacionales [9]. Para la realización de la medida se ha utilizado el método recomendado por la CIE [10] basado en la expresión del flujo entre dos aperturas circulares cuyos ejes coinciden [11]:

$$\Phi \cong \frac{L \cdot A \cdot A_D}{z^2 + R^2 + R_D^2}, \quad (1)$$

siendo:

Φ - flujo que pasa desde la apertura de entrada, fuente, hasta la de salida, detector

L - luminancia constante en la apertura de entrada

A y A_D - áreas de la fuente y el detector respectivamente

R y R_D - radios de la apertura emisora, fuente, y de la receptora, detector, respectivamente

z - distancia entre los centros de las aperturas

Por otra parte el flujo luminoso a través de la superficie receptora, en nuestro caso recibido por el detector es:

$$\Phi = E \cdot A_D, \quad (2)$$

siendo E la iluminancia en la apertura del detector. De (1) y (2) se obtiene muy fácilmente la expresión que relaciona la luminancia de la fuente con la iluminancia en el detector, y teniendo en cuenta que $R_D^2 \ll z^2 + R^2$, $R_D^2 / (z^2 + R^2) = 6,704 \cdot 10^{-5}$ en nuestro caso, se puede escribir:

$$E = L \cdot \frac{A}{z^2 + R^2}. \quad (3)$$

Para respetar la validez de la medida de uniformidad habrá que realizar la medida de luminancia tomando sólo la superficie sobre la que se definió la uniformidad, que en nuestro caso es un círculo de radio 50 mm. Para ello se dispone de una máscara que oculta el resto de la apertura del patrón. Las medidas de luminancia para la calibración de este patrón se realizan colocando esta máscara, siempre que se utilice este método. Si se tiene en cuenta que la iluminancia E viene dada por el cociente entre la

fotocorriente eléctrica en el patrón I_v y su responsividad luminosa R_v , se puede escribir que la luminancia del patrón será:

$$L = \frac{z^2 + R^2}{A} \cdot \frac{I_v}{R_v}. \quad (4)$$

En un patrón de esta clase es muy conveniente disponer de dos valores de luminancia calibrados; lo que en nuestro caso se consigue con un filtro neutro LMT 05A340-1, cuya transmitancia nominal es aproximadamente del 10%. La medida de la luminancia de la fuente con este filtro se realiza con el mismo proceso descrito antes, pero se debe tener en cuenta que al introducir el filtro no sólo se cambia el valor de la luminancia, sino que se modifica ligeramente la TCC. La medida de la TCC de la fuente con el filtro se puede hacer con garantía suficiente utilizando un fotómetro/colorímetro PR-880 de la marca Photo Research, que ha sido calibrado en TCC respecto a las lámparas patrones del laboratorio usando el espectro-radiómetro de referencia del Departamento de Metrología del IFA. Al objeto de no perder la trazabilidad de la medida se mide la TCC de la fuente con el PR-880, tanto con filtro neutro como sin él, el valor obtenido de la fuente sin filtro se compara con el obtenido anteriormente a partir de la distribución espectral y se calcula el factor de corrección. Puesto que la TCC de la fuente con el filtro neutro y las distribuciones espectrales son continuas y muy parecidas en ambos casos, se puede aplicar el mismo factor de corrección a la TCC de la fuente con el filtro neutro medida con el colorímetro PR880. De los resultados de esta medida se obtiene que el filtro produce un incremento en la TCC de +19 K, por tanto la TCC verdadera del patrón con filtro es 2875 K.

Se debe recordar que el valor 2856 K no se ha medido directamente sino que es el resultado de una estimación a partir de las medidas de la TCC de la fuente en función de la intensidad de corriente alimentación, según vimos en el apartado anterior.

Siguiendo el mismo procedimiento explicado anteriormente se mide la luminancia del patrón con el filtro LMT 05A340-1. Los valores obtenidos para ambas configuraciones están en la tabla I.

Tabla I Luminancia del patrón	
Sin filtro	1142 Cd·m ⁻² ± 0,74 % ⁽¹⁾
Con el filtro neutro	116 Cd·m ⁻² ± 0,94 % ⁽¹⁾

(1) $k=2$

Desde el punto de vista de la luminancia, partiendo de los valores en la tabla I, la transmitancia luminosa del filtro es: $\tau = 0,1016 \pm 0,0016$ ($k=2$).

En el apartado 4 se indican con detalle los cálculos de todas las componentes de incertidumbre de esta medida.

4. Cálculo de incertidumbres

La ecuación completa de medida de la luminancia en ambos casos es:

$$L_v = \frac{z^2 + R^2}{A} \cdot \frac{I_v}{R_v} \cdot H_s \cdot D_s \cdot F(\varepsilon_{PL}) \cdot G(\varepsilon_{FP}) \cdot (1 - c_{stray}) \cdot C(J_v) \quad (5)$$

donde L_v , z , R , A , I_v , R_v tienen el mismo significado que en (4), H_s es un término que representa la homogeneidad de la superficie emisora D_s es un término que representa la corrección debida a la deriva temporal, $F(\varepsilon_{PL})$ es un término de corrección que da cuenta del desalineamiento del patrón de luminancia y $G(\varepsilon_{FP})$ del desalineamiento del fotómetro patrón, respectivamente. Estos cuatro últimos tienen un valor esperado igual a 1, como se deduce de los resultados de la caracterización de la fuente y de la experiencia, sin embargo dan lugar a sus correspondientes términos de incertidumbre $u(H_s)$, $u(D_s)$, $u(F(\varepsilon_{PL}))$ y $u(G(\varepsilon_{FP}))$. El término $(1 - c_{stray})$ representa la influencia de la luz esparcida en la medida. No se considera corrección en el valor, pero da lugar a un término de incertidumbre que se determina a partir de la experiencia y considerando el montaje usado en la medida. Por otra parte la corriente de alimentación del patrón de luminancia, J_v , es un término que se mide cuando éste se pone en marcha y por tanto da lugar también a un término de incertidumbre que será estudiado posteriormente. El valor de $C(J_v)$ también se considera 1.

Aplicando las recomendaciones de ISO [12-13] y otras [14] para el cálculo de las incertidumbres a la ecuación de medida, se tiene:

$$\frac{u^2(L)}{L^2} = \frac{u^2(z^2)}{(z^2)^2} + \frac{u^2(A)}{A^2} + \frac{u^2(I_v)}{I_v^2} + \frac{u^2(R_v)}{R_v^2} + \frac{u^2(H_s)}{H_s^2} + \frac{u^2(D_s)}{D_s^2} + \frac{u^2(F(\varepsilon_{PL}))}{F^2(\varepsilon_{PL})} + \frac{u^2(G(\varepsilon_{FP}))}{G^2(\varepsilon_{FP})} + \frac{u^2(c_{stray})}{(1 - c_{stray})^2} + \frac{u^2(C(J_v))}{C^2(J_v)} \quad (6)$$

en la que se ha realizado la aproximación $(z^2 + R^2)/A \cong z^2/A$, ya que en nuestro caso estos términos valen $1.7096 \cdot 10^3$ y $1.7093 \cdot 10^3$ respectivamente.

Incetidumbre de la distancia z entre el patrón de luminancia y el fotómetro patrón, $u(z)$

La distancia entre los aros protectores del patrón de luminancia y el fotómetro patrón se mide por medio de unas barras calibradas con su correspondiente

certificado de calibración, de modo que a esta distancia se deben añadir las distancias respectivas entre dichos aros y sus correspondientes superficies sensibles.

La distancia total medida es $1832,00 \pm 0,03$ mm ($k=2$), por tanto la incertidumbre relativa debida a este término, $u(z^2)/(z^2) = 2 \cdot u(z)/z = 1.64 \cdot 10^{-5}$ ($k=1$).

Incetidumbre del área de la superficie activa del patrón de luminancia, $u(A)$

La medida del radio de la apertura de la superficie difusora del patrón con la máscara limitadora mencionada en el apartado anterior es de $25,45 \pm 0,01$ mm ($k=2$), entonces $u(A)/A = 2 \cdot u(R)/R = 7.86 \cdot 10^{-4}$ ($k=1$).

Incetidumbre de la fotocorriente, $u(I_v)$

El valor de la fotocorriente es el promedio de un conjunto de medidas siendo la desviación típica de la media 1.25×10^{-3} para el PL sin filtro y 3.13×10^{-3} para el PL con filtro. Para obtener la incertidumbre debida a la fotocorriente, habrá que añadir la establecida en el certificado de calibración del picoamperímetro (480×10^{-6} relativa, $k=1$). El total de este término de incertidumbre relativa es 1.34×10^{-3} para el patrón de luminancia sin filtro y 3.17×10^{-3} para el mismo con el filtro neutro.

Incetidumbre de la responsividad en iluminancia del fotómetro patrón, $u(R_v)$

Se toma del certificado de calibración del fotómetro; es el término más importante de los que se han considerado; su valor es $3.4 \cdot 10^{-3}$ (relativa $k=1$).

Incetidumbre debida a la no uniformidad de la superficie emisora, $u(H_s)$

Este término es el resultado de la medida descrita en el apartado 3.1 y su valor es $3.0 \cdot 10^{-4}$ (relativa $k=1$).

Incetidumbre debida a la inestabilidad temporal, $u(D_s)$

Este término es el resultado de la medida descrita en el apartado 3.2, y su valor es $1.4 \cdot 10^{-5}$ (relativa $k=1$).

Incetidumbre debida a los desalineamientos de los ejes de ambos patrones $u(F(\varepsilon_{PL}))$ y $u(G(\varepsilon_{FP}))$

Otra fuente de incertidumbre es el desalineamiento del eje óptico del patrón de luminancia con respecto al eje del sistema. Para su evaluación consideraremos que el giro del patrón de luminancia alrededor del eje Z, figura 6, no tiene efecto apreciable sobre la iluminancia medida y, dado que la superficie emisora es lambertiana, la variación del flujo luminoso sobre la superficie activa del fotómetro patrón depende del ángulo ε formado por los ejes ópticos del patrón de luminancia y el sistema. Por otra parte el sistema de posicionamiento

del patrón de luminancia permite los giros φ y ν alrededor de los ejes X e Y, respectivamente. El valor de ε está relacionado con φ y ν por la expresión:

$$\begin{aligned}\sin^2 \varepsilon &= \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 \nu = \\ \sin^2 \nu + \cos^2 \nu \cdot \sin^2 \varphi &= 1 - \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 \nu\end{aligned}\quad (7)$$

Podemos entonces hallar ε y $u(\varepsilon)$ conociendo φ , $u(\varphi)$, ν y $u(\nu)$, aplicando la expresión (7) y la regla de propagación de incertidumbres. Los valores de los coeficientes de sensibilidad deben resolverse para $\varepsilon \rightarrow 0$ lo que implica que $\varphi \rightarrow 0$ y $\nu \rightarrow 0$. Suponiendo que $\nu = q \cdot \varphi$, lo que no es ninguna restricción en los valores de φ y ν , y si consideramos que $u(\varphi) = u(\nu)$, como pasa en la realidad, tendremos:

$$u^2(\varepsilon) = \frac{1}{1+q^2} u^2(\varphi) + \frac{q^2}{1+q^2} u^2(\nu) = u^2(\varphi) = u^2(\nu) \quad (8)$$

En nuestro caso ⁽¹⁵⁾ se considera que la resolución con que se miden los desalineamientos φ y ν es menor que 1° , por tanto se puede considerar una incertidumbre $u(\varepsilon) = u(\varphi) = u(\nu) = 0.5 \cdot \pi / 180 / 3^{1/2} = 5.0 \cdot 10^{-3}$ rad. Entonces el término de incertidumbre relativa de la luminancia debido a los desalineamientos del patrón de luminancia se puede estimar en $1.25 \cdot 10^{-5}$.

Lo dicho a lo largo de este apartado es igualmente aplicable al término de incertidumbre debido a los desalineamientos del fotómetro patrón que tiene el mismo valor que el anterior.

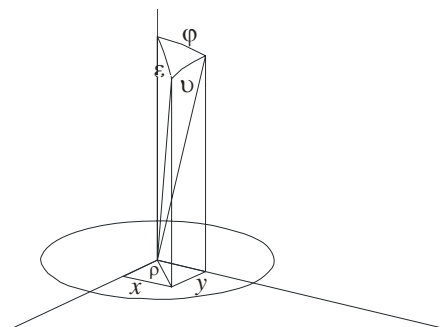


Fig. 6. Ángulos de desalineamiento del Patrón de Luminancia

Incertidumbre debida a la luz esparcida $u(c_{\text{stray}})$

El valor de esta corrección viene determinada por estudios previos realizados sobre el sistema de medida. Es posible minimizar sus efectos, si se aísla adecuadamente el experimento del entorno. Se considera una corrección nula con una distribución de probabilidad rectangular de $\pm 0,0003$. Por lo tanto la incertidumbre típica será: $u(c_{\text{stray}}) = 0.0003 / 3^{1/2}$.

Incertidumbre debida a la corriente de alimentación $u(J_v)$

La corriente de alimentación del patrón de luminancia tiene un valor nominal J_R , pero su valor se controla con el sistema que se puede ver en la figura 2 de este trabajo. Debido a que la corriente real de alimentación, J_v , no puede reproducir exactamente la de referencia J_R fijada en el apartado 3.3, aparece en nuestro caso un término de incertidumbre que trataremos de resolver. Basado en las expresiones en ^(15, 16) se puede escribir:

$$C(J_v) = \frac{L_R}{L_v} = \left(\frac{J_R \Omega}{c_v V_v} \right)^{m_L}, \quad (9)$$

siendo:

L_v – luminancia real

L_R – luminancia de referencia

c_v – coeficiente de calibración del voltímetro digital

V_v – tensión en bornas de la resistencia patrón. Se obtiene como promedio de una serie de medidas y su incertidumbre típica $u(V_v)$ será la desviación típica de la media de ese conjunto más la incertidumbre propia del voltímetro.

J_R – intensidad de corriente de alimentación de referencia

Ω – resistencia patrón

m_L – exponente de variación que es conocido para una lámpara de incandescencia ⁽¹⁵⁾ y cuyo valor es 6.87 y su incertidumbre $u(m_L) = 0.1443$ ($k=1$) con distribución de probabilidad rectangular

Si se llama:

$$J_v = \frac{c_v \cdot V_v}{\Omega} \quad (10)$$

tendremos:

$$C(J_v) = \left(\frac{J_R}{J_v} \right)^{m_L} \quad (11)$$

Aplicando de nuevo la fórmula de propagación de incertidumbres tendremos:

$$\frac{u^2(C(J_v))}{C^2(J_v)} = m_L^2 \left(\frac{u^2(J_v)}{J_v^2} + \ln^2 \frac{J_R}{J_v} \cdot \frac{u^2(m_L)}{m_L^2} \right) \quad (12)$$

Por otra parte aplicando, como siempre, la fórmula de propagación de incertidumbres a la expresión (10) se puede obtener el valor de $u(J_v)$, ya que se conocen c_v y Ω y sus incertidumbres respectivas, $u(c_v)$ y $u(\Omega)$, de los correspondientes Certificados de Calibración y V_v y $u(V_v)$ de la medida y el Certificado de Calibración del voltímetro digital.

Como $\Omega = 0.00999949 \text{ Ohm}$, $u(\Omega)/\Omega = 2 \cdot 10^{-5}$, $V_v = 1.7012 \cdot 10^{-2} \text{ V}$ y $u(V_v)/V_v = 3.0 \cdot 10^{-5}$, será $J_v = 1.70133 \text{ A}$ y $u(J_v)/(J_v) = 3.6 \cdot 10^{-5}$. A su vez, de los valores anteriores, se obtiene para la componente de incertidumbre relativa debida a la corriente de alimentación $u(C(J_v))/C(J_v) = 6.6 \cdot 10^{-4}$. Todos los valores de incertidumbre expresados en este apartado son $k=1$.

5. Conclusiones

Se ha realizado un patrón de luminancia a partir de dos componentes comerciales: fuente luz consistente en una esfera integradora, que es el medio que proporciona las fuentes de luz con luminancia uniforme más extensas, con una no uniformidad que proporciona un término de incertidumbre de 0,04 % y una fuente de corriente continua de gran estabilidad y programable, con una inestabilidad que proporciona un término de incertidumbre inferior a 0,0006 %.

El patrón de luminancia se ha calibrado usando el fotómetro patrón FOTI, calibrado en iluminancia, y que es trazable internamente a la Candela, Patrón Nacional de Intensidad Luminosa del que es depositario el Departamento de Metrología del IFA-CSIC (Real Decreto 1219/1992, de 2 de octubre), que, a su vez, es trazable al Patrón Primario de Radiometría del Departamento de Metrología del IFA-CSIC. Además está avalado internacionalmente a través de la Comparación Internacional CCPR3-K3.b (<http://kcdb.bipm.org>). El método empleado se adecua perfectamente a nuestro caso dando como resultado final, el valor de la luminancia con una incertidumbre expandida relativa igual o inferior a 0.74%, después de considerar las fuentes de incertidumbre de forma exhaustiva.

Queda este nuevo patrón incorporado al conjunto de Patrones Fotométricos del Departamento de IFA donde será usado para dar trazabilidad a los patrones y luminancímetros, tanto exteriores como interiores, que lo requieran.